



Karl Sommer
Rudolf Heinz
Jörg Schöfer

Verschleiß metallischer Werkstoffe

Erscheinungsformen sicher beurteilen

2. Auflage

 Springer Vieweg

Verschleiß metallischer Werkstoffe

Karl Sommer · Rudolf Heinz · Jörg Schöfer

Verschleiß metallischer Werkstoffe

Erscheinungsformen sicher beurteilen

2., korrigierte und ergänzte Auflage

Mit 621 Abbildungen und zahlreichen Tabellen

 Springer Vieweg

Karl Sommer
Lorch, Deutschland

Rudolf Heinz · Jörg Schöfer
Robert Bosch GmbH
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-8348-2463-9
DOI 10.1007/978-3-8348-2464-6

ISBN 978-3-8348-2464-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2010, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Lektorat: Thomas Zipsner, Ellen Klabunde

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

„Das Volumen des Festkörpers wurde von Gott geschaffen, seine Oberfläche aber wurde vom Teufel gemacht.“ Dieser viel zitierte Ausspruch wird dem Physiker und Nobelpreisträger Wolfgang Pauli zugeschrieben. Auch wenn Pauli damals sicherlich nicht an Probleme aus dem Bereich der tribologischen Schadensanalyse dachte, dürfte das prägnante Zitat manchem Ingenieur aus der Seele sprechen, der heute versucht, anhand von Bildern der verschlissenen Oberfläche eines Produktes eindeutige Rückschlüsse auf die Schadensursache und die zu treffende Abhilfemaßnahme zu ziehen.

In der Tat ist die Menge der möglichen Erscheinungsformen des Verschleißes schwer zu überschauen, selbst wenn man sich auf eine bestimmte Materialklasse, zum Beispiel die metallischen Werkstoffe, beschränkt. Auch die Verknüpfung eines tribologischen Schadensbildes mit seiner Ursache ist häufig nicht trivial. So können ähnliche Verschleißmechanismen zu sehr unterschiedlichen Schadensbildern führen und vergleichbare Verschleißerscheinungen verschiedene Mechanismen als Ursache haben.

Der Hauptgrund für diese Vielfältigkeit der Erscheinungsformen und die Schwierigkeit der Rückführung auf ihre Ursachen ist in der Komplexität der an der Oberfläche verschleißender Körper stattfindenden physikalischen und chemischen Vorgänge zu suchen. Diese Vorgänge, und damit der Verschleiß, hängen nicht nur von den Eigenschaften des Werkstoffs bzw. der Oberfläche ab, sondern auch von dem System, in dem sich die Oberfläche befindet. Der Verschleiß ist insofern nicht als Eigenschaft des Werkstoffes zu sehen, sondern als seine Antwort auf die im System herrschenden Beanspruchungen und Randbedingungen.

Auch wenn die tribologische Forschung in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere im Bereich der Beanspruchungssimulation deutliche Fortschritte gemacht hat, ist es auch heute noch in vielen Fällen schwer oder unmöglich, alle Einflussparameter richtig zu erfassen und in ihrer Wirkung auf den Verschleiß zu beschreiben. Daher ist die Schadensanalyse, die über die genaue Untersuchung der Verschleißerscheinungsformen einer Oberfläche und den Vergleich mit bekannten Schadensfällen aus der Vergangenheit die Ursache für den unerwünschten Verschleiß herausarbeitet, nach wie vor eine der wichtigsten Vorgehensweisen bei der Vermeidung tribologisch bedingter Schäden. Um so mehr verwundert es, dass die Menge an Fachliteratur, die sich mit einer Übersicht über Verschleißerscheinungsformen und ihrer Zuordnung zu Verschleißarten und Maschinenelementen befasst, vergleichsweise überschaubar ist. Diese Lücke für den Bereich der metallischen Werkstoffe zu füllen und eine solide und langfristig wirksame Grundlage für die tribologische Schadensanalyse zu schaffen, ist das Hauptanliegen dieses Buches.

Das nun in der 2. Auflage vorliegende Werk ist vor allem für die praktische Arbeit des Ingenieurs gedacht. Es soll mit der Behandlung zahlreicher Schadensbeispiele aus den vergangenen Jahrzehnten konkrete Hilfestellung bei der Analyse und Beurteilung von Verschleißproblemen bieten und die Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Optimierung von Sicherheit und Zuverlässigkeit beim Betrieb von Anlagen und Maschinen ermöglichen. Entsprechend der großen Bedeutung, die den Abbildungen in diesem Buch zukommt, wurde in der 2. Auflage neben der Beseitigung von Druckfehlern besonderer Wert auf die Verbesserung der Bildqua-

lität gelegt. In Kapitel 3 wurde die Beschreibung der Vorgehensweise bei Schadensanalysen angepasst, um die anzuwendende Systematik klarer herauszuarbeiten. Schließlich wurden an einzelnen Stellen Literaturquellen aktualisiert und neue Beispiele eingefügt.

Eine solche Sammlung von Schadensbeispielen lebt nicht nur stark von der eigenen wissenschaftlichen Erfahrung der Autoren, sondern auch vom beruflichen Umfeld, in dem diese Erfahrungen erworben wurden. Darüber hinaus ist sie undenkbar ohne die Einbeziehung der zahlreichen Arbeiten aus dem universitären Bereich und der Industrie, welche die Vielfalt und Geschlossenheit der Darstellung erst möglich machen. Entsprechend danke ich meinen Co-Autoren Dr.-Ing. Rudolf Heinz und Dr.-Ing. Jörg Schöfer herzlich für die Mitwirkung an diesem Werk, insbesondere für die Erarbeitung von Kapitel 5 und die vielen Anregungen zu den anderen Kapiteln. Auch gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Robert Bosch GmbH, die durch ihre wertvollen Diskussionen und ihre intensive Unterstützung bei der Auswahl und Analyse aussagekräftiger Verschleißbilder zur Bereicherung des vorliegenden Buches beigetragen haben. Weiterhin danke ich den Firmen und Personen, die freundlicherweise die Genehmigung zur Veröffentlichung ihres Bildmaterials erteilten, und deren Name ich jeweils in den Bildunterschriften vermerkt habe.

Herrn Thomas Zipsner und Frau Ellen Klabunde vom Lektorat Maschinenbau des Verlags Springer Vieweg danke ich für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit und vor allem für die mir gegenüber geübte Geduld.

Besonders danke ich meiner lieben Frau Luise für ihre Unterstützung während der jahrelangen Bearbeitung des Buches, die viele Einschränkungen auf sich genommen und Opfer gebracht hat. Meine Tochter Sabine hat sich der Mühe des Korrekturlesens mit Sorgfalt unterzogen, wofür ich mich auch bei ihr bedanke.

Lorch, im Februar 2014

Karl Sommer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | V |
| Die Autoren | XIII |
| 1 Einführung | 1 |
| Literaturverzeichnis | 2 |
| 2 Tribologische Grundlagen | 3 |
| 2.1 Tribologisches System | 3 |
| 2.2 Reibung | 6 |
| 2.2.1 Makroskopische Betrachtung | 7 |
| 2.2.2 Mikroskopische Betrachtung | 7 |
| 2.2.3 Reibungsarten | 10 |
| 2.2.4 Reibungszustände | 11 |
| 2.2.5 Reibungszahlen | 12 |
| 2.3 Verschleißarten | 14 |
| 2.4 Verschleißmechanismen | 14 |
| 2.4.1 Adhäsion | 16 |
| 2.4.2 Abrasion | 18 |
| 2.4.3 Oberflächenzerrüttung | 20 |
| 2.4.4 Tribochemische Reaktion | 21 |
| 2.4.5 Ablation | 23 |
| 2.5 Zusammenhang zwischen Reibung und Verschleiß | 24 |
| 2.6 Ausfallkriterien | 28 |
| Literaturverzeichnis | 31 |
| 3 Methodik der Analyse tribologischer Schäden | 35 |
| 3.1 Strukturanalyse | 37 |
| 3.2 Beanspruchungsanalyse | 38 |
| Literaturverzeichnis | 39 |
| 4 Gleitverschleiß | 41 |
| 4.1 Grundlagen geschmierter Tribosysteme | 41 |
| 4.1.1 Hydrodynamik | 41 |
| 4.1.2 Mischreibung und Grenzreibung | 43 |
| 4.2 Verschleißerscheinungsformen bei Hydrodynamik und Mischreibung | 46 |
| 4.2.1 Riefen | 47 |
| 4.2.2 Einbettung von Fremdpartikeln | 50 |
| 4.2.3 Eindrückungen | 53 |
| 4.2.4 Ausbrüche | 53 |
| 4.2.5 Ungleichmäßiges Tragbild | 57 |
| 4.2.6 Rattermarken | 58 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.7 | Fresser | 60 |
| 4.2.8 | Werkstoffübertrag | 65 |
| 4.2.9 | Schubrisse | 68 |
| 4.2.10 | Brandrisse | 70 |
| 4.2.11 | Gefügeänderung | 73 |
| 4.2.12 | Schmelzerscheinungen | 79 |
| 4.2.13 | Stromübergang | 82 |
| 4.2.14 | Tribochemische Reaktionsschicht | 84 |
| 4.2.15 | Plastische Oberflächenverformung | 87 |
| 4.2.16 | Profiländerung | 89 |
| 4.3 | Grundlagen ungeschmierter Tribosysteme | 91 |
| 4.3.1 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 92 |
| 4.3.2 | Strukturbedingte Einflüsse | 97 |
| 4.4 | Besonderheiten bei Trockenreibung im Vakuum | 101 |
| 4.5 | Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Gleitreibung | 102 |
| 4.5.1 | Fresser | 102 |
| 4.5.2 | Riefen | 103 |
| 4.5.3 | Werkstoffübertrag | 104 |
| 4.5.4 | Schubrisse | 105 |
| 4.5.5 | Brandrisse | 105 |
| 4.5.6 | Gefügeänderung | 108 |
| 4.5.7 | Tribooxidation | 113 |
| | Literaturverzeichnis | 114 |
| 5 | Schwingungsverschleiß (<i>Fretting</i>) | 122 |
| 5.1 | Grundlagen | 122 |
| 5.1.1 | Bewegungsformen | 122 |
| 5.1.2 | Stofftransport und Reibungszustand | 122 |
| 5.1.3 | Systemklassen | 123 |
| 5.1.4 | Verschleißmechanismen bei Schwingungsverschleiß | 125 |
| 5.1.4.1 | Adhäsion mit Werkstoffübertrag | 125 |
| 5.1.4.2 | Abrasion | 125 |
| 5.1.4.3 | Tribooxidation | 126 |
| 5.1.4.4 | Oberflächenzerrüttung | 127 |
| 5.1.4.5 | Zeitlicher Wechsel von Verschleißmechanismen am Beispiel von Zahnwellenverbindungen und -kupplungen | 127 |
| 5.2 | Verschleißerscheinungsformen durch Schwingungsverschleiß | 130 |
| 5.2.1 | Beläge (Tribooxidation, Reiboxidation, Reibroost, Passungsrost) | 131 |
| 5.2.2 | Narben | 140 |
| 5.2.3 | Mulden | 143 |
| 5.2.4 | Riffel | 145 |
| 5.2.5 | Wurmspuren | 150 |
| 5.2.6 | Stillstandsmarkierungen (<i>false brinelling</i>) | 154 |
| 5.2.7 | Schwingungsverschleiß mit überwiegend einem Verschleißmechanismus | 162 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | Reibdauerbrüche (<i>fretting fatigue</i>) | 165 |
| 5.4 | Allgemeine Hinweise zur Minderung von Schwingungsverschleiß | 178 |
| | Literaturverzeichnis | 181 |
| 6 | Wälzverschleiß | 185 |
| 6.1 | Grundlagen | 185 |
| 6.1.1 | Allgemeiner Überblick | 185 |
| 6.1.2 | Hertzsche Pressung ungeschmiert | 186 |
| 6.1.3 | Hertzsche Pressung geschmiert | 190 |
| 6.1.4 | Schädigungsbetrachtungen | 196 |
| 6.1.5 | Vergleich ertragbarer Hertzscher Pressungen | 198 |
| 6.1.6 | Zahnräder | 199 |
| 6.1.6.1 | Allgemeines | 199 |
| 6.1.6.2 | Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse | 202 |
| 6.1.6.3 | Tribochemische Reaktion | 207 |
| 6.1.6.4 | Adhäsion | 212 |
| 6.1.6.5 | Abrasion | 215 |
| 6.1.6.6 | Oberflächenzerrüttung | 216 |
| 6.1.7 | Wälzlager | 229 |
| 6.1.7.1 | Allgemeines | 229 |
| 6.1.7.2 | Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse | 231 |
| 6.1.7.3 | Tribochemische Reaktion | 239 |
| 6.1.7.4 | Adhäsion | 242 |
| 6.1.7.5 | Abrasion | 243 |
| 6.1.7.6 | Oberflächenzerrüttung | 244 |
| 6.1.8 | Kurvengetriebe | 252 |
| 6.1.8.1 | Allgemeines | 252 |
| 6.1.8.2 | Beanspruchungs- und strukturbedingte Einflüsse | 253 |
| 6.1.9 | Gleichlaufgelenke | 257 |
| 6.1.10 | Rad/Schiene | 259 |
| 6.2 | Verschleißerscheinungsformen bei vollständiger Elastohydrodynamik (EHD) .. | 263 |
| 6.2.1 | Gefügeänderung | 264 |
| 6.2.2 | Abblätterung | 270 |
| 6.3 | Verschleißerscheinungsformen bei Mischreibung unter Elastohydrodynamik ... | 272 |
| 6.3.1 | Ungleichmäßiges Tragbild | 272 |
| 6.3.2 | Tribochemische Reaktionsschicht | 277 |
| 6.3.3 | Riefen | 279 |
| 6.3.4 | Fresser | 284 |
| 6.3.5 | Profiländerung | 289 |
| 6.3.6 | Graufleckigkeit | 298 |
| 6.3.7 | Grübchen | 308 |
| 6.3.8 | Abblätterung | 317 |
| 6.3.9 | Abplatzer | 325 |
| 6.3.10 | Schichtbruch | 328 |
| 6.3.11 | Riffel | 329 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4 | Verschleißerscheinungsformen bei ungeschmierter Wälzreibung | 342 |
| 6.4.1 | Profiländerung | 342 |
| 6.4.2 | Riffel | 344 |
| 6.4.3 | Rissbildungen und Ausbrüche | 347 |
| 6.4.4 | Gefügeänderung | 349 |
| | Literaturverzeichnis | 351 |
| 7 | Abrasivverschleiß | 370 |
| 7.1 | Grundlagen | 370 |
| 7.2 | Zweikörper-Abrasivverschleiß – Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn | 378 |
| 7.2.1 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 379 |
| 7.2.2 | Strukturbedingte Einflüsse | 380 |
| 7.3 | Verschleißerscheinungsformen bei Abrasiv-Gleitverschleiß durch gebundenes Korn | 392 |
| 7.3.1 | Riefen | 392 |
| 7.3.2 | Einbettung | 394 |
| 7.3.3 | Ausbrüche | 394 |
| 7.3.4 | Brandrisse | 395 |
| 7.3.5 | Gefügeänderung | 397 |
| 7.3.6 | Profiländerung | 398 |
| 7.4 | Dreikörper-Abrasivverschleiß | 400 |
| 7.4.1 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 402 |
| 7.4.2 | Strukturbedingte Einflüsse | 403 |
| 7.4.2.1 | Abrasive Stoffe als Zwischenstoffe | 403 |
| 7.4.2.2 | Grund- und Gegenkörper | 403 |
| 7.5 | Verschleißerscheinungsformen bei Dreikörper-Abrasivverschleiß | 411 |
| 7.5.1 | Riefen | 411 |
| 7.5.2 | Einbettung | 414 |
| 7.5.3 | Schubrisse | 414 |
| 7.5.4 | Mulden | 415 |
| 7.5.5 | Riffel | 416 |
| 7.5.6 | Profiländerung | 417 |
| | Literaturverzeichnis | 422 |
| 8 | Erosion und Erosionskorrosion | 427 |
| 8.1 | Allgemeine Grundlagen | 427 |
| 8.2 | Grundlagen Abrasiv-Gleitverschleiß durch loses Korn (Erosion) | 428 |
| 8.2.1 | Allgemeines | 428 |
| 8.2.2 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 429 |
| 8.2.3 | Strukturbedingte Einflüsse | 430 |
| 8.3 | Verschleißerscheinungsformen bei Erosion durch loses Korn | 432 |
| 8.3.1 | Querwellen, Mulden | 432 |
| 8.3.2 | Riefen | 435 |
| 8.3.3 | Selektive Erosion | 436 |
| 8.3.4 | Profiländerung | 440 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 8.4 | Grundlagen Strahlverschleiß | 441 |
| 8.4.1 | Allgemeines | 441 |
| 8.4.2 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 442 |
| 8.4.2.1 | Anstrahlwinkel | 442 |
| 8.4.2.2 | Partikelgeschwindigkeit | 446 |
| 8.4.2.3 | Temperatur | 447 |
| 8.4.2.4 | Partikeldurchsatz | 449 |
| 8.4.2.5 | Partikelgröße | 449 |
| 8.4.3 | Strukturbedingte Einflüsse | 451 |
| 8.4.3.1 | Partikeleigenschaften | 451 |
| 8.4.3.2 | Werkstoffeigenschaften | 453 |
| 8.5 | Verschleißerscheinungsformen bei Strahlverschleiß | 460 |
| 8.5.1 | Querwellen, Mulden | 460 |
| 8.5.2 | Riffel | 467 |
| 8.5.3 | Eindrückungen | 468 |
| 8.5.4 | Profiländerung | 470 |
| 8.6 | Grundlagen hydroerosiver (hydroabrasiver) Verschleiß | 475 |
| 8.6.1 | Allgemeines | 475 |
| 8.6.2 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 478 |
| 8.6.3 | Strukturbedingte Einflussgrößen | 482 |
| 8.6.3.1 | Abrasivstoffhärte | 482 |
| 8.6.3.2 | Korngröße | 484 |
| 8.6.3.3 | Befeuchtung | 489 |
| 8.6.3.4 | pH-Wert | 490 |
| 8.6.3.5 | Werkstoffverhalten | 493 |
| 8.7 | Verschleißerscheinungsformen bei hydroerosivem Verschleiß | 497 |
| 8.7.1 | Längs- und Querwellen, Mulden, Rillen | 497 |
| 8.7.2 | Eindrückungen | 507 |
| 8.7.3 | Riefen | 508 |
| 8.7.4 | Selektive Erosion | 509 |
| 8.7.5 | Profiländerung | 511 |
| 8.8 | Grundlagen Erosionskorrosion | 511 |
| 8.8.1 | Allgemeines | 511 |
| 8.8.2 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 514 |
| 8.8.3 | Strukturbedingte Einflüsse | 519 |
| 8.9 | Verschleißerscheinungen durch Erosionskorrosion | 522 |
| 8.9.1 | Auswaschungen, Querwellen, Mulden | 522 |
| 8.9.2 | Riffel | 528 |
| 8.9.3 | Längswellen | 530 |
| 8.9.4 | Selektive Korrosion | 531 |
| 8.10 | Grundlagen Kavitationserosion | 532 |
| 8.10.1 | Allgemeines | 532 |
| 8.10.2 | Entstehung und Wirkung von Kavitation | 534 |
| 8.10.3 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 536 |
| 8.10.4 | Werkstoffverhalten | 538 |
| 8.10.5 | Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Kavitationserosion | 543 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.11 | Verschleißerscheinungsformen durch Kavitationserosion | 544 |
| 8.11.1 | Erosion durch Schwingungs- und Strömungskavitation | 544 |
| 8.11.2 | Aufrauung | 552 |
| 8.11.3 | Ausbrüche | 559 |
| 8.12 | Grundlagen Tropfenschlagerosion | 560 |
| 8.12.1 | Allgemeines | 560 |
| 8.12.2 | Beanspruchungsbedingte Einflüsse | 561 |
| 8.13 | Verschleißerscheinungen bei Tropfenschlagerosion | 564 |
| 8.13.1 | Mulden | 564 |
| 8.13.2 | Aufrauung | 565 |
| 8.14 | Gaserosion | 568 |
| | Literaturverzeichnis | 569 |
| 9 | Anhang | 583 |
| 9.1 | Farbiger Bildteil | 583 |
| 9.2 | Gegenüberstellung von alter (DIN) und neuer (Euro-Norm) Werkstoffbezeichnung | 588 |
| | Sachwortverzeichnis | 593 |

Die Autoren

Dr.-Ing. Karl Sommer, geb. 1940 in Troppau. 1962 bis 1970 Studium des Maschinenbaus an der TH Stuttgart. 1970 bis 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Staatlichen Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart in den Abteilungen Tribologie und Schadensanalyse. 1997 Promotion. Arbeitsgebiete: Tribologie, Werkstoffkunde, Schadenskunde und Wärmebehandlung.

Dr.-Ing. Rudolf Heinz, geb. 1939 in Darmstadt. 1963 bis 1969 Studium des Maschinenbaus an der TH Darmstadt. 1969 Diplomprüfung in Maschinenbau. 1970 bis 1977 wissenschaftlicher Assistent und Dozent im Fachgebiet Maschinenelemente. 1977 Promotion. 1977 bis 2003 Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart in der Forschung, Arbeitsgebiet Tribologie, und in der Serienentwicklung mit Arbeitsgebiet Dieseleinspritztechnik. Seit 2004 Berater bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart.

Dr.-Ing. Jörg Schöfer, geb. 1969 in Bremen. 1990 bis 1996 Studium der Physik an der Universität Göttingen und der University of California Santa Cruz. 1996 bis 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Fachgruppe Tribologie. 2001 Promotion an der Universität Karlsruhe, Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr. Seit 1998 Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH Stuttgart in der zentralen Forschung und Vorentwicklung, Arbeitsschwerpunkte Tribologie und Ventiltechnik.

1 Einführung

Die Oberfläche verschlissener Bauteile und die dort sichtbaren Verschleißerscheinungsformen können als eine der entscheidenden Informationsquellen für die Aufklärung tribologischer Schadensfälle bezeichnet werden, da sie – wenn auch nur im Nachhinein – einen direkten Zugang zu der beanspruchten Zone des Werkstoffes ermöglichen. Dies gilt in besonderem Maße für unvermutet an einem Produkt auftretende Schäden, da hier in der Regel keine prophylaktischen Maßnahmen zur begleitenden Untersuchung des Schädigungsverlaufs ergriffen wurden, wie beispielsweise Reibungs-, Temperatur oder Körperschallmessungen. So geben die Erscheinungsformen des Schadens an der Oberfläche den ersten direkten visuellen Hinweis auf die Schädigungsursache, der dann durch weitere Untersuchungen von Werkstoffgefüge, Beanspruchungsbedingungen etc. ergänzt werden kann, bis ein möglichst geschlossenes Bild des Verschleißhergangs vorliegt.

Die Deutsche Gesellschaft für Tribologie definiert den Begriff der Verschleißerscheinungen als „*sich durch Verschleiß ergebende Veränderungen der Oberflächen eines Körpers sowie die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel.*“ [1]. Für einen Rückschluss auf die Schadensursache enthalten sowohl die Oberflächenmodifikationen als auch die Verschleißpartikel wichtige Hinweise. In der Praxis allerdings stehen die entstandenen Verschleißpartikel, wenn sie nicht gezielt gesammelt wurden, oft nicht mehr für eine genauere Untersuchung zur Verfügung, so dass der Schwerpunkt einer Schadensanalyse sich häufig auf die Betrachtung der Oberflächenveränderungen konzentriert.

Ausgehend von dieser Erfahrung sollte eine Abhandlung zu Verschleißerscheinungsformen metallischer Werkstoffe in der Hauptsache eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Schadensbilder der verschlissenen Oberflächen enthalten. Es erscheint allerdings notwendig, einige weitere Aspekte ebenfalls zu berücksichtigen: Zum einen betrifft dies die Größe, Form und chemische Zusammensetzung der oben erwähnten Verschleißpartikel. Weiterhin ist in Erweiterung der Definition der Verschleißerscheinungsformen auch die Beschreibung von Oberflächenmodifikationen sinnvoll, die infolge eines tribologischen Prozesses zu einer Beeinträchtigung der Oberflächengrenzschicht führen, ohne bereits einen direkt wahrnehmbaren Materialverlust verursacht zu haben. Dies ist beispielsweise bei Anrissbildung in Zerrüttungszonen, Brandrissen oder Gefügeumwandlungen der Fall. Die dabei auftretenden Erscheinungen führen nicht notwendigerweise sofort zu einer Beeinträchtigung der Funktion oder gar zum Versagen, können aber oftmals als Vorstufen des Verschleißes betrachtet werden, die erst im Laufe des Betriebes eine Funktionsstörung bewirken. Wichtig ist darüber hinaus auch die Erwähnung derjenigen tribologischen Oberflächenveränderungen, die als ausgesprochen erwünscht betrachtet werden, wie die Veränderungen der Grenzschicht durch Reaktionsschichtbildung bei geschmierten Systemen, die sich verschleißmindernd auswirken. Hier ist eine Abgrenzung zu unerwünschten Verschleißerscheinungsformen notwendig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Entsprechend dieser Vorüberlegungen haben die Autoren bei der Umsetzung dieses Buches besonderen Wert auf eine umfangreiche Sammlung von bebilderten Beispielen zu den Verschleißerscheinungsformen tribologisch beanspruchter Oberflächen gelegt, die auf Basis eige-

ner Arbeiten und einer sorgfältigen Sichtung der Literatur zusammengestellt sind. Im Sinne einer möglichst guten Anwendbarkeit, liegt der Schwerpunkt dieser beispielhaften Darstellungen auf Erzeugnissen und Maschinenelementen. Wenn dennoch Modellversuche aufgeführt sind, so gerade deshalb, weil Einflüsse auf bestimmte Verschleißprozesse wegen ihrer kontrollierten und gezielt variierbaren Beanspruchungsbedingungen klarer herausgearbeitet werden können. Eine ausführliche Kommentierung der Verschleißerscheinungsformen soll dem Entwickler helfen, diese sicher auf die eigenen Schadensfälle zu übertragen und die erforderlichen Abhilfemaßnahmen zu ergreifen.

Grundlage für die angestrebte Übersicht der Verschleißerscheinungsformen ist eine sinnvolle Ordnungsstruktur sowie die einheitliche und korrekte Anwendung von Begriffen, um Missverständnisse und Fehlinterpretationen in der Praxis zu vermeiden. Als Ordnungsrahmen der Verschleißerscheinungen wurde die Sortierung nach den verursachenden Verschleißarten gewählt, um eine direkte Verbindung zwischen dem Schadensbild und der Belastungssituation der Bauteile herzustellen und dem Leser die Ursachenfindung anhand der dargestellten Beispiele zu erleichtern. Eine einheitliche Darstellung der Begriffe ist durchaus als nicht trivial zu betrachten, da für die konkrete Bezeichnung der einzelnen Verschleißerscheinungsformen, ihrer Beschreibung und insbesondere ihrer Abgrenzung untereinander nicht in allen Fällen auf gut etablierte Definitionen zurückgegriffen werden kann. Es wurden hier in der Regel die in der Literatur am breitesten verwendeten Begriffe ausgewählt und systematisch eingesetzt, wohl wissend, dass in dem einen oder anderen Punkt insbesondere bei der Abgrenzung der Verschleißerscheinungsformen noch Klärungsbedarf besteht.

Berechnungsgrundlagen für eine Auslegung tribologisch beanspruchter Bauteile werden in diesem Buch nicht behandelt. Die in einigen Fällen angegebenen Gleichungen dienen lediglich zur Orientierung und zur Einordnung von Einflussgrößen auf den Verschleiß bzw. auf die Verschleißerscheinungsformen.

Die Gliederung dieses Buches beginnt mit einer allgemeinen Darstellung der tribologischen Grundlagen. Es folgt ein kurzer Abriss der Methodik der tribologischen Schadensanalytik, der den Leser mit den wichtigsten Aspekten der ihrer praktischen Umsetzung vertraut machen soll, ohne einen ausführlichen Lehrgang zu diesem Thema ersetzen zu können. Den Hauptteil des Buches bilden fünf nach Verschleißarten geordnete Kapitel zu den Verschleißerscheinungsformen metallischer Werkstoffe. Im Sinne der leichteren Lesbarkeit ist die Unterstruktur dieser Kapitel weitgehend identisch gehalten. Den beschriebenen Verschleißerscheinungsformen sind jeweils die Grundlagen der behandelten Verschleißarten und ggf. Maschinenelemente vorangestellt. Mögliche Abhilfemaßnahmen, die in den Grundlagenkapiteln besprochen oder direkt bei der Beschreibung der jeweiligen Verschleißerscheinungsform erwähnt werden, sollen über die Fallbeispiele hinaus Anregungen für eine kritische Auseinandersetzung mit den eigenen Schadensfällen geben und auf das Spektrum der Lösungsalternativen hinweisen.

Literaturverzeichnis

- [1] GfT-Arbeitsblatt 7: Tribologie. Verschleiß, Reibung. Definitionen, Begriffe, Prüfung. Ausgabe August 2002

2 Tribologische Grundlagen

2.1 Tribologisches System

Funktion und Fertigung eines Bauteiles erfordern Werkstoffe, die vielfältigen Anforderungen gerecht werden müssen. An den Grundwerkstoff werden häufig nicht dieselben extremen Anforderungen wie an die Oberfläche bzw. Grenzschicht gestellt [1, 2]. Während die Auslegung eines Bauteiles bei mechanischer und mechanisch-thermischer Beanspruchung nach Festigkeitsgesichtspunkten erfolgt, die sich vor allem auf das Bauteilvolumen beziehen, müssen bei tribologischer Beanspruchung, die über die Kontaktfläche durch Normal- und Tangentialkräfte wirkt, komplexe und irreversible Prozesse in der Grenzschicht berücksichtigt werden. Diese Prozesse werden von zahlreichen Parametern beeinflusst, so dass das tribologische Verhalten nur als systembedingtes Verhalten zu beschreiben ist und gerade wegen der komplexen Prozesse in vielen Fällen einer ursächlichen Beschreibung nicht zugänglich ist. Das tribologische System ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [3]:

- I Funktion
- II Beanspruchungskollektiv
- III Struktur
 - am Verschleiß beteiligte Elemente
 - Eigenschaften der Elemente
 - Wechselwirkungen der Elemente
- IV Reibungs- und Verschleißkenngrößen.

Ein solches System ist vereinfacht in **Bild 2.1** wiedergegeben. Bereits mit der Beschreibung der Funktion (I) sind bestimmte Vorgaben hinsichtlich zu verwendender Werkstoffe und konstruktiver Gestaltung verknüpft. Einen besonderen Stellenwert nimmt die Analyse der unter dem Beanspruchungskollektiv (II) zusammengefassten Parameter – Belastung 4, Bewegung 5 und Temperatur 6 – und der strukturbildenden Elemente einschließlich ihrer Eigenschaften und ihrer Wechselwirkungen (III) – bestehend aus Grundkörper 1, Gegenkörper 2, Zwischenstoff 3a und Umgebungsmedium 3b – ein, da bereits geringe Abweichungen von der Spezifikation das tribologische Verhalten entscheidend beeinflussen und oft unbedeutend erscheinende Störfaktoren, wie z. B. Verunreinigungen oder veränderte Wärmeableitung, für einen Schaden ausschlaggebend sein können oder sogar erst eine Erklärung hierfür bieten. Während das Beanspruchungskollektiv im Sinne einer eingeleiteten Energie als Eingangsgröße zu betrachten ist, stellen Reibungs- und Verschleißkenngrößen (IV) die Ausgangsgrößen dar. Hierüber geben die Verschleißerscheinungsformen oft die einzigen Hinweise auf die im Mikrokontakt wirksam gewesenen Verschleißmechanismen (vgl. Kap. 2.4) und auf die bleibenden Veränderungen an den Elementen, die sich in meist zum Werkstoffinnern abklingenden spannungsmäßigen, strukturellen und auch chemischen Abweichungen gegenüber dem Ausgangszustand äußern. Auch Verschleißpartikel und besonders deren Größe und Form können bei der Aufklärung von Verschleißvorgängen hilfreich sein. Die stofflichen Wechselwirkungen zwischen den strukturbildenden Elementen in Verbindung mit dem Beanspruchungskollektiv haben also größte Bedeutung und bilden oft den Schlüssel für zunächst nicht erklärbare Ergebnisse bzw. Schäden.

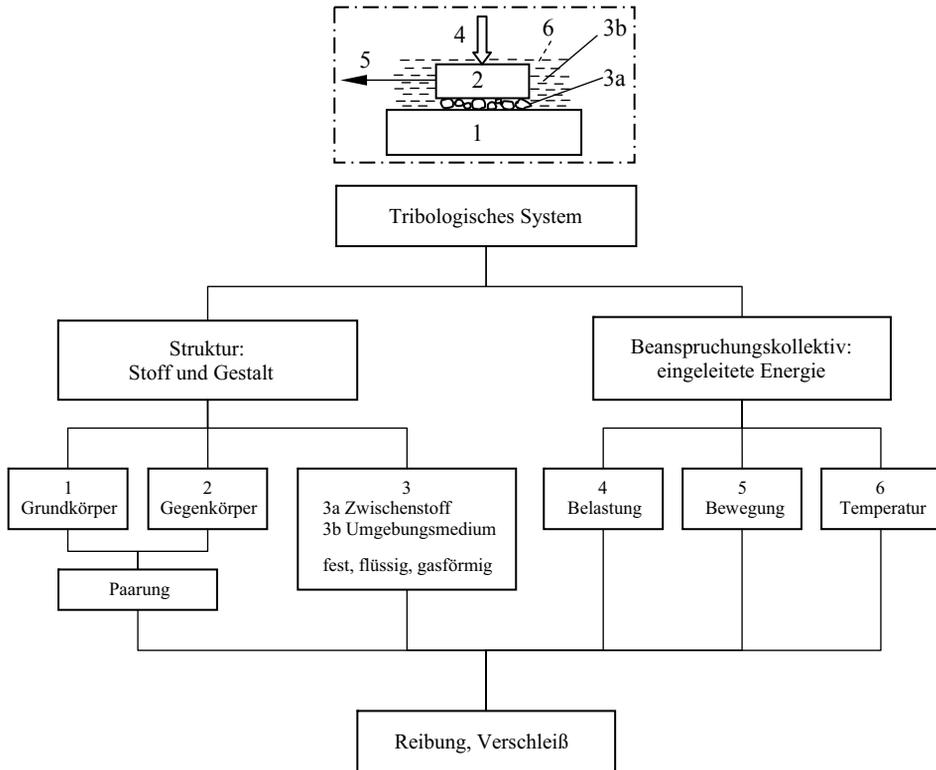


Bild 2.1: Tribologisches System mit den kennzeichnenden Elementen

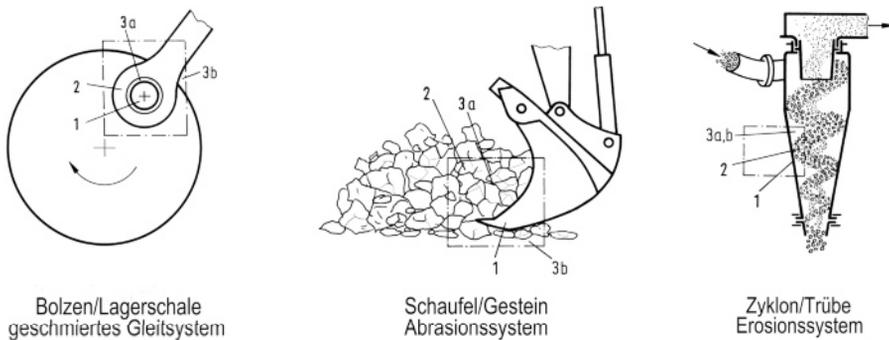
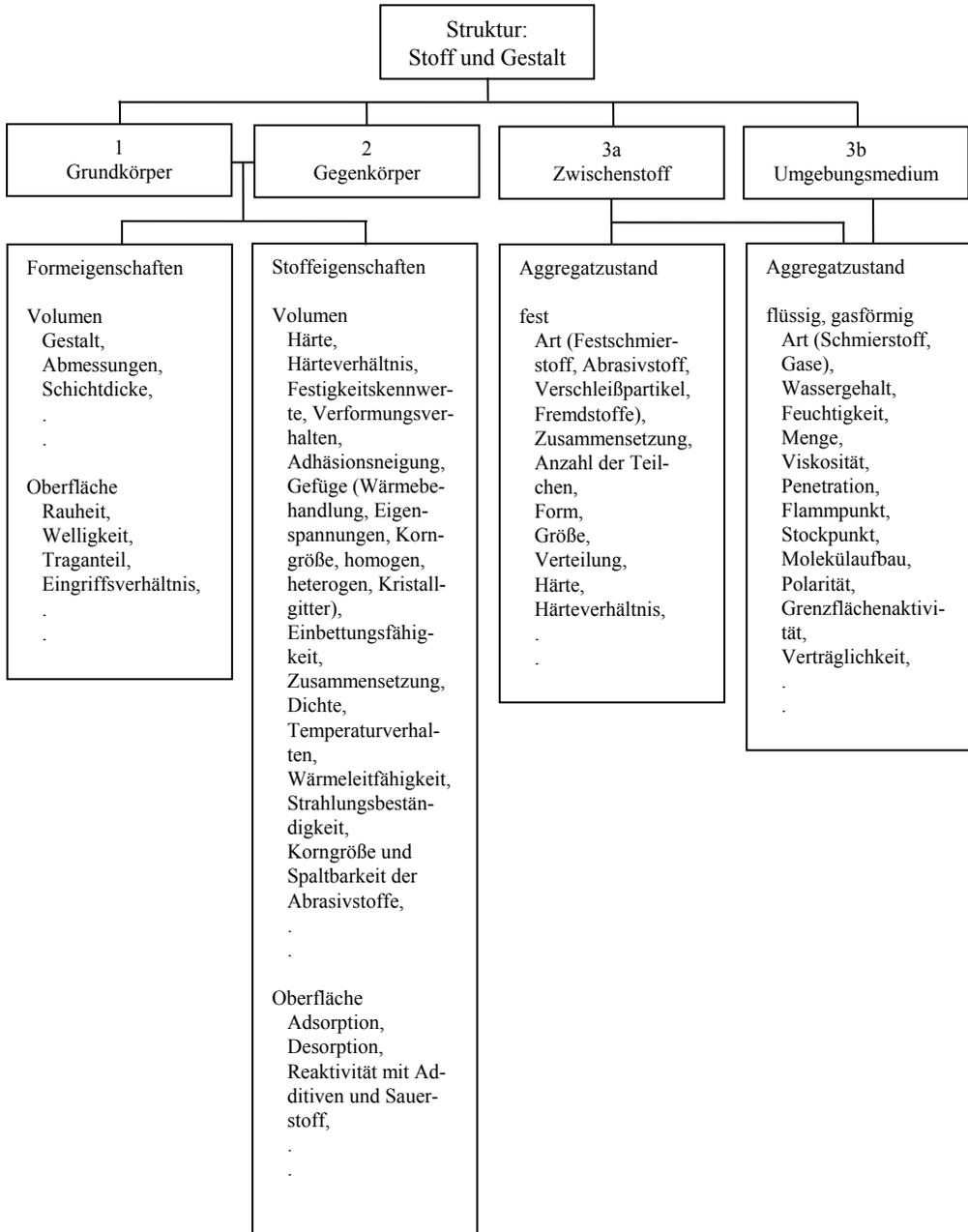


Bild 2.2: Beispiele für tribologische Systeme; Systemeinhüllende strichpunktiert

Beispiele verschiedener tribologischer Systeme sind in **Bild 2.2** aufgeführt. Die tribologische Kontaktstelle ist durch eine Systemeinhüllende (strichpunktierte Linie) von den übrigen Konstruktionsbauteilen gedanklich abgegrenzt. Das linke Beispiel steht für ein geschlossenes Sys-

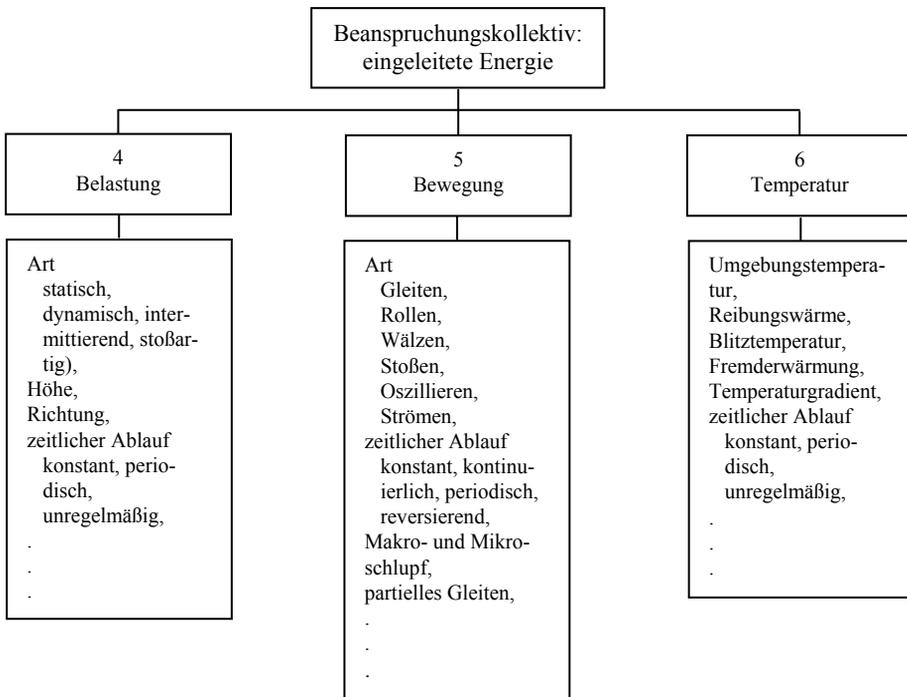
tem, während die beiden rechten Beispiele offene Systeme darstellen, die mit einem stets neuen Materialfluss beaufschlagt werden. Bei den beiden offenen Systemen stellen die abrasiv wirkenden Stoffe den Gegenkörper dar, wobei der Zwischenstoff z. B. Wasser sein kann und das Umgebungsmedium in der Regel Luft ist.

Tabelle 2.1: Auswahl struktureller Einflussgrößen auf den Verschleißprozess



Das tribologische System mit dem Beanspruchungskollektiv und den Strukturelementen stellt den ordnenden Rahmen für eine erfolgreiche Bearbeitung von Verschleißproblemen dar. Eine ausführliche Darstellung der ordnenden Gesichtspunkte und Begriffe findet man u. a. in [1, 2]. Die Kenntnis über die systemtechnischen Elemente ist deshalb von gravierender Bedeutung, weil der Konstrukteur mit ihrer Wahl das Verschleißgeschehen am Bauteil bereits weitgehend festgelegt hat. Die beim Verschleißprozess ablaufenden Wechselwirkungen sind infolge vielfältiger Einflussgrößen, **Tabelle 2.1** und **2.2**, weder durch die Werkstoff- noch durch die Oberflächeneigenschaften der beteiligten Partner allein zu charakterisieren. Aufgrund dieser Besonderheit tribologischer Systeme ist es nicht möglich, einem Werkstoff oder einer Paarung eine „Verschleißfestigkeit“ im Sinne eines Werkstoffkennwertes zuzuordnen, wie es sinngemäß bei vom Ingenieur benutzten Festigkeitskennwerten – an Normproben bestimmt – üblich ist. Die Verschleißkenngrößen sind somit, wie auch die strukturellen Eigenschaften (Form- und Stoffeigenschaften, Aggregatzustand), vom System abhängig. Es empfiehlt sich daher, von Verschleißbeständigkeit zu sprechen.

Tabelle 2.2: Auswahl beanspruchungsbedingter Einflussgrößen auf den Verschleißprozess



2.2 Reibung

Reibung zwischen zwei Körpern ist, wie der Verschleiß, keine Werkstoff- oder Werkstoffpaarungseigenschaft, sondern eine Systemeigenschaft. Sie äußert sich in Kraftwirkungen und beeinflusst nahezu alle Vorgänge in Natur und Technik. In bewegten Systemen ist wegen des

zusätzlichen Kräftebedarfs Reibung meist unerwünscht, da sie die Funktion von Maschinen beeinträchtigt und nicht nur erhebliche Energieverluste, sondern auch Temperaturerhöhung und bei fortgesetzter Bewegung Verschleiß bewirkt. Immer dort, wo sich Bewegungswiderstände störend auswirken, wird daher versucht werden, diese durch geeignete Maßnahmen wie Schmierung oder Ersatz der gleitenden Bewegung durch kraftsparende Rollbewegung zu mindern. Die Ausnutzung der Reibung ist aber auch unabdingbare Voraussetzung für eine Vielzahl von Funktionen, bei denen Kräfte „kraftschlüssig“ durch Reibung übertragen werden müssen, wie z. B. bei Reibkupplungen oder Bremsen. Dies gilt ebenso für die Funktion von Schraubenverbindungen, für das Halten von Nägeln oder von Fäden im Gewebe, für die Fortbewegung eines Fußgängers oder Fahrzeuges und für das Erklingen eines Streichinstrumentes.

2.2.1 Makroskopische Betrachtung

Reibung ist eines der am längsten bekannten Phänomene, deren wissenschaftliche Erforschung jedoch erst im 15. Jahrhundert durch Leonardo da Vinci erfolgte und von Guillaume Amontons, Leonard Euler, Charles Augustin Coulomb und Arthur-Jules Morin erweitert wurde. Ihre Untersuchungen führten phänomenologisch zu dem von Coulomb formulierten Gesetz der Festkörperreibung bei Gleitbewegungen, die von Fläche und Geschwindigkeit unabhängig ist:

$$f = F_R / F_N \quad (2.1)$$

Darin bedeuten f = Reibungszahl, F_N = Normalkraft und F_R = Reibungskraft.

Nach heutigen Erkenntnissen gelten jedoch diese Zusammenhänge nur näherungsweise und in bestimmten Grenzen. Tatsächlich hängen Reibungskraft und Reibungszahl sowohl von den Beanspruchungsparametern als auch von der tribologischen Struktur, d. h. von den beteiligten Stoffen, ab. Erstaunlich ist, dass z. B. bei einer Verdoppelung der geometrischen Kontaktfläche die Reibungskraft konstant bleiben soll, obwohl sich die nominelle Flächenpressung halbiert und sich damit die lokalen Reibungsmechanismen oft ändern. Die Erklärung, aber auch die Grenzen der Coulombschen Gesetze liegen in der Unterscheidung zwischen der geometrischen Kontaktfläche und der wahren Kontaktfläche, was in Kap. 2.2.2 näher betrachtet wird.

Reibung zwischen Festkörpern bezeichnet man als äußere Reibung. In der Regel werden darunter mechanische Widerstände (Kräfte und Momente) verstanden, die den Bewegungsablauf hemmen (Bewegungsreibung) oder verhindern (Ruhreibung). Im GfT-Arbeitsblatt 7 wird allgemeiner von einer Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern gesprochen [3]. Als Prozesse sind im Wesentlichen Adhäsions-, Abrasions-, elastisch-plastische Deformations- und Bruchvorgänge wirksam.

2.2.2 Mikroskopische Betrachtung

Die Reibung als Energieumsetzungsprozess (überwiegend in Wärmeenergie) läuft in Oberflächengrenzschichten ab, **Bild 2.3**, in denen sich physikalische und chemische Wechselwirkungen zwischen den Partnern in Form von Oberflächen- und Werkstoffveränderungen ab-

spielen. Die Grenzschichten unterscheiden sich oft grundlegend vom unbeeinflussten Grundwerkstoff. Im Gegensatz zur Volumeneigenschaft des Grundwerkstoffes sind ihre Oberflächeneigenschaften schwierig zu bestimmen, unter Umständen ist dies gar nicht möglich. Jeder Bearbeitungsvorgang und jeder tribologische Vorgang verändert die Grenzschicht und beeinflusst das tribologische Geschehen entscheidend. So weist beispielsweise die durch den Bearbeitungsprozess entstandene Polierschicht eine amorphe Struktur auf.

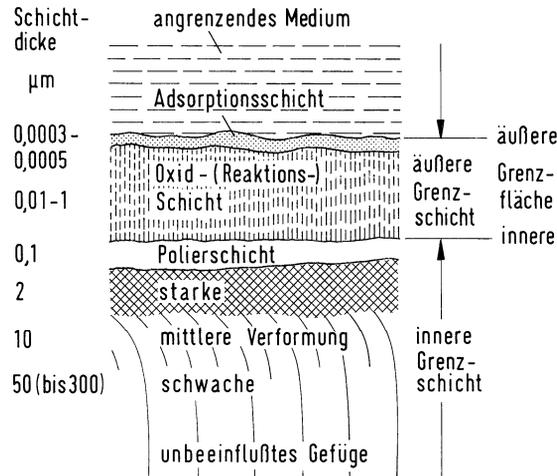


Bild 2.3: Schematischer Aufbau technischer Werkstoffgrenzschichten; die angegebenen Schichtdicken sind Orientierungswerte

Neben den stofflichen Besonderheiten der inneren und äußeren Grenzschichten spielen Oberflächengestalt und Berührungsverhältnisse der sich im Kontakt befindlichen Körper eine wichtige Rolle. Infolge eines hohen Elastizitätsmoduls und hoher Streckgrenze konzentriert sich die Beanspruchung bei metallischen Werkstoffen im allgemeinen auf relativ wenige Kontaktbereiche. Die wahre Kontaktfläche ist im Vergleich zur geometrischen Kontaktfläche selbst bei feinst bearbeiteten Körpern und hohen Lasten klein und beträgt nur Promille bzw. wenige Prozent der „scheinbaren“ Kontaktfläche [4]. Durch die Unterscheidung zwischen wahrer und „scheinbarer“, d. h. geometrischer Kontaktfläche, erfährt das Gesetz von Coulomb (Gl. 2.1) eine Bestätigung, aber auch eine Korrektur. Im ruhenden Kontakt führt das Auftreten von Normalkräften zur elastisch-plastischen Deformation der Mikroerhebungen, wodurch sich die wahre Kontaktfläche so lange vergrößert, bis diese der Belastung gerade stand hält. Bei Normalkrafterhöhung bilden sich bis zu einer Grenzlast neue Kontaktstellen, ohne dass sich die nominelle Flächenpressung ändert. Konstante Flächenpressung bedeutet in erster Näherung konstante Reibungszustände und damit konstante Reibungszahl f . Damit ist das Coulombsche Gesetz in gewissen Lastbereichen anwendbar. Bei genauer Betrachtung deuten Experimente doch auf eine Abhängigkeit der Reibungskraft von der wahren Kontaktfläche hin. Aufgrund dieses Modells realer Oberflächen wurde die Adhäsionstheorie entwickelt und von [5, 6] zur molekular-mechanischen Theorie erweitert. Durch die Entwicklung des Rasterkraftmikrosko-

pes ist es gelungen, in den atomaren Bereich vorzudringen. Dadurch wurde es möglich, im elastischen Bereich sowohl die reale Kontaktfläche [7] als auch die Reibung [8] zu messen, was wesentlich zum Verständnis der Reibung beigetragen hat. Werden trennende Adsorptions- oder Reaktionsschichten durchbrochen, bilden sich in den Kontaktbereichen Adhäsionsbrücken. Ursache hierfür sind die gleichen Bindungskräfte, wie sie auch für den Zusammenhalt der Atome in Festkörpern verantwortlich sind. Die in Festkörpern herrschenden Bindungstypen hängen von der Elektronenstruktur (metallische, kovalente, Ionen- und van der Waalssche Bindungen) ab, die die Festigkeit der Bindung bestimmt.

Häufig treten diese Bindungen gleichzeitig und in unterschiedlichen Anteilen auf. Sind an der Oberfläche von Festkörpern die Valenzen der Atome z. B. durch Sauerstoff abgesättigt, so werden nur noch die schwachen van der Waalsschen Bindungen wirksam. Während des Reibungsvorganges werden durch die Beanspruchung die Oberflächen deformiert und die Grenzschichten (vgl. Bild 2.3) mehr oder weniger zerstört. Durch die Annäherung der Festkörper bis in atomare Bereiche entstehen Bindungen unterschiedlicher Festigkeit. Diese wird beeinflusst u. a. von der Struktur der Festkörper, von Art und Zustand der äußeren Grenzschicht (adsorbierte Gase, Reaktionsschichten) sowie von Belastung und Bewegung und damit von Anzahl und Größe der Kontaktstellen, die bei Einsetzen der Relativbewegung abgesichert, neu gebildet und wieder abgesichert werden. Die Trennung findet dabei immer in der Ebene geringster Scherfestigkeit statt, d. h. je nach Stärke von Verbindung und Verfestigungsgrad in der ursprünglichen Kontaktzone oder im Werkstoff des weicheren Partners. Die Verlagerung der Trennebene aus der ursprünglichen Kontaktzone führt zur Werkstoffübertragung von einem Partner auf den andern (vgl. Mechanismus der Adhäsion Kap. 2.4.1). Je höher die Adhäsionsbindungen, desto größere Kräfte können übertragen werden und sich auf ein größeres in die Tiefe erstreckendes Volumen beziehen. Neben dieser kraftschlüssigen Verbindung durch Adhäsionsbrücken erfolgt auch eine Kraftübertragung durch Mikroformschluss mit den Oberflächenunebenheiten. Besteht zwischen den Mikroerhebungen aufeinander gleitender Oberflächen ein Härteunterschied, z. B. durch Verfestigung oder ungleiche Ausgangshärte, so wird das weichere Material von dem härteren gefurcht. Dieser Vorgang äußert sich in einer Mikroverformung und Mikrozerspanung (vgl. Mechanismus der Abrasion Kap. 2.4.2). Die Reibung lässt sich als Energieumsetzung definieren, die sich aus einem Adhäsions- und einem Deformationsanteil zusammensetzt. Bei sich zäh verhaltenden Werkstoffen, deren Verformungsvermögen erschöpft und bei spröden Werkstoffen ist auch noch ein Anteil für Bruchvorgänge zu berücksichtigen:

$$W_R = W_{ad} + W_{def} + W_{Bruch} \quad (2.2)$$

Eine quantitative Angabe der einzelnen Anteile ist in der Regel jedoch nicht möglich, da immer von einer Überlagerung und von Änderungen der Anteile während der Beanspruchung auszugehen ist. Für Gleitreibungsprozesse kann aus der Verlustenergie W_R längs des Gleitweges s eine mittlere Reibungskraft F_R

$$W_R = \int F_R \cdot ds \quad (2.3)$$

bestimmt werden.

2.2.3 Reibungsarten

Bei der Reibung zwischen Festkörpern wird grundsätzlich zwischen Ruhereibung (Haftreibung, statische Reibung) und Bewegungsreibung (dynamische Reibung) unterschieden [3]. Haftreibung wirkt zwischen zwei ruhenden Körpern, bei denen die angreifende Kraft oder das angreifende Moment nicht ausreicht, eine Relativbewegung der Festkörper einzuleiten. Die Haftreibung ist im Gegensatz zur Gleitreibung nicht mit einem Energieumsetzungsprozess verbunden und somit entstehen auch keine Verluste. Die bei der Bewegungsreibung zwischen relativ zueinander bewegten Körpern auftretenden Reibungskräfte wirken der Bewegungsrichtung entgegen und versuchen die Bewegung zu hemmen.

Die Bewegungsreibung wird nach kinematischen Gesichtspunkten noch weiter unterteilt in Gleit-, Bohr-, Roll- und Wälzreibung. Gleitreibung entsteht z. B. bei translatorischer Bewegung eines Körpers auf einer Unterlage oder in Gleitlagern. Von Bohrreibung spricht man bei rotatorischer Relativbewegung zwischen Körpern, deren Drehachse senkrecht zur Kontaktfläche steht. Sie ist durch einen Geschwindigkeitsgradienten längs des Radius gekennzeichnet. Rollreibung ist eine Bewegungsreibung zwischen sich quasi punkt- oder linienförmig berührenden Körpern, deren Relativgeschwindigkeit in der gemeinsamen Kontaktstelle im idealisierten Fall gleich null ist. Ist der Rollreibung eine Gleitkomponente überlagert, so spricht man von Wälzreibung. Bei der Ausführung tribologischer Systeme ist die Wälzreibung der Gleitreibung im Bereich der Festkörper- und Grenzreibung und auch der Mischreibung wegen massiver Schädigung der Kontaktfläche durch höhere Energieumsetzung vorzuziehen. Allen Arten der Bewegungsreibung ist gemeinsam, dass sie mit einem Verlust an mechanischer Energie verbunden sind, die in andere Energieformen umgewandelt wird. Der weitaus größte Anteil wird in Wärme umgewandelt, während nur ein kleiner Teil z. B. als Gitterdefekte oder Eigenspannungen gespeichert wird oder als Schallemission verloren geht. Ein weiterer Teil der Reibenergie kann als Verschleiß wirksam werden.

Im Allgemeinen ist die Reibungszahl der Ruhereibung größer als die der Bewegungsreibung. Der Unterschied zwischen diesen Reibungszahlen wird nach neueren Untersuchungen [9] mit der für die Bildung von Adhäsionsverbindungen zur Verfügung stehenden Zeit und mit den während des Reibprozesses entstehenden hochfrequenten mechanischen Schwingungen begründet. Eine längere Adhäsionsbildungszeit erhöht die Adhäsionskräfte, Schwingungsanregungen verringern sie. Die Ruhereibung scheint nach [9] eine Funktion der Zeit zu sein. Eine Zeitabhängigkeit wird auch bei Schrumpfsitzen beobachtet, die erst nach einigen Tagen die volle Haftkraft erreichen, was möglicherweise primär auf die elastisch-plastische Deformation der Mikroerhebungen in der Trennfuge zurückzuführen sein dürfte, die von Relaxationsprozessen abhängt [10].

Eine wirkungsvolle Erhöhung der Haftreibung in reibschlüssigen Verbindungen wie z. B. Welle-Nabe- oder Stirnpress-Verbindungen, bieten direkt beschichtete Fügestellen von Bauteilen oder Ni-beschichtete Stahlfolien, in die feine harte Partikel aus Diamant der Korngröße 6 bis 10 μm eingebettet sind und mit ihren Spitzen überstehen [11, 12]. Die Körner drücken sich in Grund- und Gegenkörper ein und erhöhen damit den Mikroformschluss. Die Haftreibung lässt sich so bis zum 3fachen gegenüber Körpern ohne Beschichtung steigern. Maßgebend für die Höhe der Haftreibung sind neben Flächenpressung Oberflächenrauheit und

Werkstoffhärte, sowie Korngröße und Belegungsdichte der Partikel. Zur Verringerung von Schlupf bei Riemenantrieben werden Beschichtungen mit eingelagerten Partikeln aus SiC oder Si₃N₄ der Korngröße von 2,5 µm eingesetzt [13].

Schon seit langem ist bekannt, dass umgekehrt durch Einleitung von Ultraschall in tribologische Systeme Reibungskräfte verringert werden können. Bei Überlagerung von Schwingungen in Hauptrichtung der Bewegung oder quer dazu werden die Reibungskräfte kleiner. Diese Erkenntnis eröffnet der Umformtechnik ein breites Anwendungsfeld, z. B. beim Rohr- und Drahtzug [14]. Neben der Reibkraftreduktion, die höhere Umformgrade zulässt, wird auch eine Verbesserung der Oberflächengüte erzielt. Dabei ist vor allem das Verhältnis von Ziehgeschwindigkeit und Schwinggeschwindigkeit entscheidend.

Bei Festkörperreibung und unter Mischreibungsbedingungen wird häufig kontinuierliches, ruckfreies Gleiten nicht erreicht, vielmehr stellt sich ein periodisches Schwanken der Reibungskraft ein. Diese als Ruckgleiten oder *stick-slip* [15, 16] bezeichnete Erscheinung ist sehr verbreitet. Sie ist bei zahlreichen Bewegungssystemen insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten zu beobachten und macht sich auch durch Geräuschbildung (Quietschen von Bremsen, Rattern von Werkzeugmaschinen) bemerkbar, vgl. Kap. 4.2.6 Rattermarken. Dieses Verhalten kann durch die Bewegungsgleichung eines Feder-Masse-Dämpfungs-Systems beschrieben werden, mit der sich die beeinflussenden Größen wie Masse, Geschwindigkeit, Federkonstante und Dämpfungsmaß erfassen lassen. Dabei ist das Verhältnis von Haft- und Gleitreibungszahl, das nahe bei 1 liegen soll, von besonderer Bedeutung, wenn Ruckgleiten unterdrückt werden soll.

2.2.4 Reibungszustände

Neben der Einteilung in Reibungsarten, die in dieser Form nur für die Kinematik der Festkörperreibung gilt, wird auch eine Klassifizierung nach dem Aggregat- bzw. dem Kontaktzustand der Reibpartner vorgenommen. Danach wird unterschieden in

- Festkörperreibung
- Trockenreibung
- ungeschmierte Reibung
- Grenzreibung
- Mischreibung
- Flüssigkeitsreibung
- hydrodynamische Reibung
- elastohydrodynamische Reibung
- aerodynamische Reibung

Von den aufgeführten Reibungszuständen lassen sich einige anhand der Gleitreibung z. B. für Radialgleitlager im erweiterten Stribeck-Diagramm übersichtlich darstellen, **Bild 2.4**, in dem über $v \cdot \eta / p$ (v = Geschwindigkeit, η = dynamische Ölviskosität, p = Pressung) tendenzmäßig die Dicke h des sich ausbildenden Schmierfilmes und die Reibungszahl f aufgetragen sind. Man unterscheidet Trockenreibung (Bereich I) mit der höchsten Reibungszahl, ungeschmierte

Reibung (Bereich II), Grenzreibung (Bereich III), Mischreibung (Bereich IV), und die hydrodynamische Reibung HD (Bereich V). Das sich bei Radialgleitlagern ausbildende Reibungsminimum befindet sich noch im Mischreibungsgebiet. Erst nach weiterer Drehzahlerhöhung (bei p und $\eta = \text{konst}$) steigt die Reibungszahl wieder an und die Mischreibung geht dann in hydrodynamische Reibung über. Die einzelnen Zustände werden bei den entsprechenden Abschnitten in Kap. 4 behandelt.

Diese Reibungszustände gelten bei Wälzbeanspruchung (vgl. Kap. 6 Wälzverschleiß), bei der der Zustand der hydrodynamischen Reibung mit Elastohydrodynamik bezeichnet wird, vgl. Kap. 6.1 Grundlagen, nur näherungsweise, insbesondere ist in diesem Zustand mit niedrigeren Reibungszahlen zu rechnen.

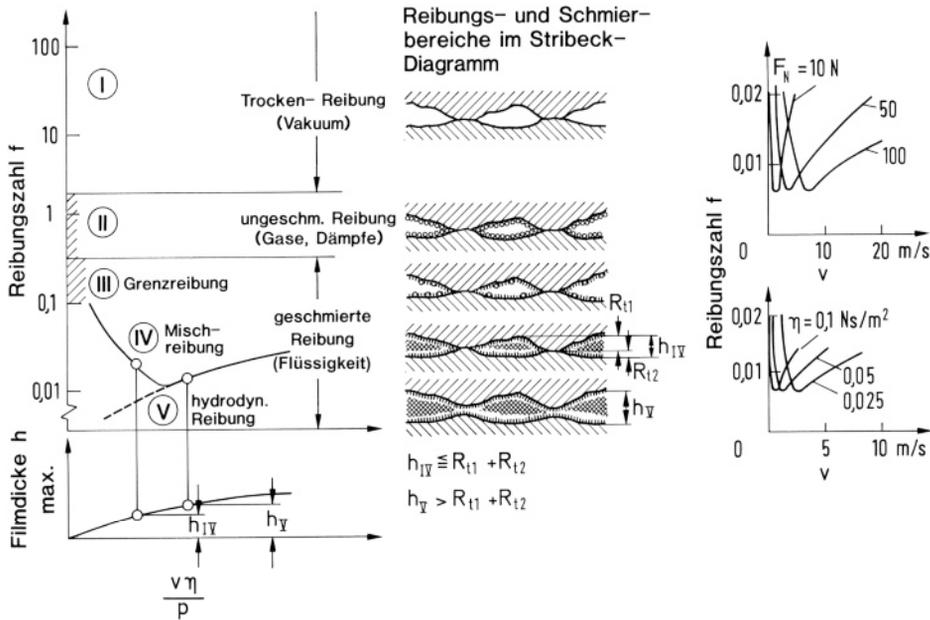


Bild 2.4: Erweitertes Stribeck-Diagramm mit den Reibungszuständen I bis V für Radialgleitlager. Rechte Teilbilder mit den Parametern Belastung F_N und dynamische Ölviskosität η

2.2.5 Reibungszahlen

Die beiden wesentlich die Reibungszahl f verursachenden Anteile – Adhäsions- und Deformationsterm – verdeutlichen, auf welche Weise die Reibungszahl beeinflusst werden kann. Während neben den Beanspruchungsparametern die Grenzschichten das Adhäsionsverhalten steuern, kommt beim Verformungsverhalten insbesondere die Kristallstruktur mit ihrem Gleitsystem (Gleitebene mal Gleitrichtung) im Gitter zum Tragen, die sich auf die Ausbildung der Größe der realen Kontaktfläche und auch auf die Adhäsionsneigung auswirkt, vgl. auch Adhäsion in Kap. 2.4.1.

Hohe Reibungszahlen aufgrund hoher Adhäsionsneigung ergeben sich vor allem bei gleichartigen Paarungen, insbesondere dann, wenn reine Metalloberflächen beim Reibungsprozess vorliegen, z. B. im Vakuum. In der Regel befinden sich jedoch Adsorptions- und/oder Reaktionsschichten auf den Gleitflächen, so dass diese für das Reibungsverhalten maßgebend sind. Bei Reibungsversuchen mit Fe/Fe im Hochvakuum von $1,33 \cdot 10^{-7}$ mbar genügt bereits eine geringe Kontamination mit Sauerstoff, um die hohe Reibungszahl von rd. 4 auf Werte von 0,30 bis 0,60 zu senken, wie sie auch im ungeschmierten Zustand bei Umgebungsatmosphäre bekannt sind, was auf die Bildung von Eisenoxiden zurückgeführt wird [17]. Von Bedeutung bei diesen Prozessen ist auch die Einwirkdauer. Dies zeigt sich bei unterschiedlich hohen Normalkräften. Bei geringen Normalkräften ist die Reibungszahl aufgrund anfänglicher Kontamination zunächst niedrig und steigt erst im Laufe der Beanspruchung bis zu einem konstanten Wert an, wenn in der Reibspur die Kontamination durch den Reibprozess entfernt ist. Bei hohen Normalkräften dagegen werden die Kontaminationsschichten durchgedrückt, so dass die Reibungszahl wegen der anfänglich hohen Adhäsion von einem hohen Wert abfällt und sich bei Fortsetzung der Gleitbewegung auf eine konstante niedrigere Reibungszahl einstellt, wenn sich z. B. Oxide gebildet haben.

Bei der Paarung ferritischer Stähle nimmt die Reibungszahl bei trockener Reibung in der Regel entsprechend dem zunehmenden Verformungsanteil mit abnehmender Härte von Martensit über Perlit zu Ferrit hin zu.

Allgemeingültige Zusammenhänge zwischen Reibungszahl und den zahlreichen Parametern bestehen nicht, so dass man bei der Ermittlung von Reibungszahlen häufig auf Versuche angewiesen ist. Daher kann der in **Tabelle 2.3** beispielhaft wiedergegebene Überblick über experimentell ermittelte Bereiche von Reibungszahlen, die sich über 5 Zehnerpotenzen erstrecken können, bei den verschiedenen Reibungsarten und -zuständen nur als Orientierung dienen. Sie

Tabelle 2.3: Größenordnungen der Gleitreibungszahlen für verschiedene Reibungsarten und -zustände

| Reibungsart | Reibungszustand | | Zwischenstoff | Reibungszahl f |
|------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|--|
| Gleitreibung | I ¹⁾ | Trockenreibung | Vakuum | $\gg 1$ ^{2, 3)} |
| | II | ungeschmierte Reibung | Gase, Dämpfe | 0,1 bis 1 ²⁾ 1,5 bis 2 ³⁾ |
| | III | Grenzreibung (Mangel-schmierung) | geringste Schmierstoff-mengen | 0,1 bis 0,3 |
| | IV | Mischreibung | teilweise Schmierstoff | 0,01 bis 0,1 |
| | V | hydrodynamische Reibung | Öl | $\leq 0,01$ |
| | | aerodynamische Reibung | | Gas |
| Roll- bzw. Wälzreibung | elastohydrodynamische Reibung, Mischreibung | | Öl, Fett | 0,001 bis 0,005 |

¹⁾ römische Zahlen vgl. Bild 2.4

²⁾ Metall / Metall

³⁾ Keramik / Keramik

sind Ausdruck dafür, dass die tribologischen Kenngrößen keine Werkstoffkennwerte darstellen, sondern die Reaktion eines komplexen Systems auf von außen aufgeprägte Kräfte und Bewegungen.

2.3 Verschleißarten

In der Technik hat sich eine Gliederung des Verschleißgebietes nach Verschleißarten, die durch die Art der tribologischen Beanspruchung (vor allem durch die Kinematik) und der tribologischen Struktur gekennzeichnet sind, **Tabelle 2.4**, als vorteilhaft erwiesen. Deshalb wird auch die Hauptgliederung der folgenden Kapitel nach den Verschleißarten Gleit-, Schwingungs-, und Wälzverschleiß sowie Abrasivverschleiß und Erosion vorgenommen, die weitere Unterteilung erfolgt nach Verschleißerscheinungsformen.

Die betrachteten Verschleißerscheinungsformen bei Gleit- und Wälzbeanspruchung (unter Hydrodynamik HD, Elastohydrodynamik EHD, Mischreibung, ungeschmierter Reibung) und bei Schwingungsverschleiß (oszillierender Beanspruchung) treten meist bei den klassischen Maschinenelementen auf, also in „geschlossenen“ Systemen.

Zu den Verschleißarten in „offenen“ Systemen zählt der Abrasivverschleiß mit Abrasiv-Gleitverschleiß, Dreikörper-Abrasivverschleiß (gleitend, wälzend, stoßend) sowie die Erosion (Strömungsverschleiß). Die Erosion umfasst den Hydroerosivverschleiß (Hydroabrasivverschleiß), Strahlverschleiß, Kavitationserosion, Tropfenschlagerosion, Flüssigkeitserosion und die Gaserosion. Abrasivverschleiß und Erosion können nicht in allen Fällen scharf getrennt werden. Vor allem bei Erosion mit Beteiligung von Flüssigkeiten und Gasen ist zu berücksichtigen, dass auch Korrosionsprozesse überlagert sein können, die durch die tribologische Beanspruchung induziert werden können, was häufig den Abtrag noch verstärkt.

Details zu den Verschleißarten finden sich jeweils zu Beginn der Grundlagenkapitel.

2.4 Verschleißmechanismen

Mit der tribologischen Beanspruchung sind in der Grenzschicht Energieumsetzungsprozesse verbunden, die zu einem Materialabtrag führen können. Der Kenntnis der dabei wirkenden Verschleißmechanismen kommt bei der Werkstoffauswahl und bei der Beurteilung von Verschleißerscheinungsformen besondere Bedeutung zu. Für die Entstehung von Verschleiß sind im Wesentlichen die Grundmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktion und Ablation verantwortlich, **Bild 2.5**, die nur in seltenen Fällen einzeln auftreten. In der Regel sind diese überlagert wirksam [3], vgl. Tabelle 2.4. Ihre Anteile am Verschleißprozess können sich während der Beanspruchung auch ändern.

Tabelle 2.4: Gliederung des Verschleißgebietes in Anlehnung an GFT-Arbeitsblatt 7

| Elemente der Systemstruktur | Tribologische Beanspruchung | | Verschleißart | Beispiele | Wirkende Mechanismen ● vorherrschend ○ untergeordnet | | | |
|---|-----------------------------|---|--|--|---|----------|----------------------|---------------------------|
| | | | | | Adhäsion | Abrasion | Oberflächenzerüttung | Tribochemische Reaktionen |
| Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Flüssigkeit) Gegenkörper 2 | Gleiten Roll Wälzen |  | Gleitverschleiß, Wälzverschleiß | Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen | (○) | (○) | ● | ○ |
| Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Verschleißpartikel, Flüssigkeitsreste, Gase oder Vakuum) Gegenkörper 2 | Gleiten |  | Gleitverschleiß | Führungsbahnen, Zylinderbüchsen | ● | ○ | ○ | ● |
| | Roll Wälzen |  | Rollverschleiß, Wälzverschleiß | Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen, Rad/Schiene | ○ | ○ | ● | ● |
| | Oszillieren |  | Schwingungsverschleiß | Passflächen, Lagersitze | ● | ● | ● | ● |
| | Stoßen |  | Stoßverschleiß | Ventilnadeln | ○ | ○ | ● | ● |
| Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Festgestein, Stückgut, Schüttgut) | Stoßen |  | Zweikörper-Abrasive Verschleiß | Prallplatten, Schlagmühlen | ○ | ● | ● | ○ |
| | Gleiten |  | | Baggerschau-feln, Schurren, Gesteinsbohrer | ○ | ● | ○ | (○) |
| Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Stückgut, Partikel) Gegenkörper 2 | Gleiten |  | Dreikörper-Abrasive Verschleiß | Verunreinigung in Lagern und Führungen | ○ | ● | ● | ○ |
| | Wälzen |  | | Wälzmühlen | ○ | ● | ● | ○ |
| | Stoßen |  | | Backenbrecher | ○ | ● | ● | (○) |
| Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit mit Partikeln) | Strömen |  | Hydroerosiv- (hydroabrasiv)verschleiß | Pumpen, Trans- portleitungen | (○) | ● | ● | ○ |
| Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas mit Partikeln) | Strömen |  | Gleitstrahl- verschleiß | pneumatische Förderanlagen | ○ | ● | ● | ○ |
| | Gleiten Stoßen |  | Schrägstrahl-, Prallstrahl- verschleiß | | ○ | ● | ● | ○ |
| Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit) | Strömen Schwingen |  | Kavitations- erosion | Pumpen, Ventile, Wasserturbinen | | | ● | ○ |
| | Stoßen Gleiten |  | Tropfen- schlagerosion | Rotorblätter, Dampfturbinen | | | ● | ○ |
| | Strömen |  | Flüssigkeits- erosion | Pumpen, Ventile, Rohrleitungen | | (○) | ○ | ● |
| Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas) | Strömen |  | Gaserosion | Gasturbinen, Hitzeschilde | | | | ● |

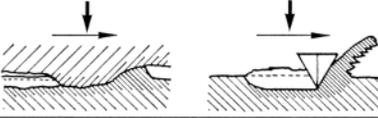
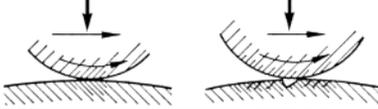
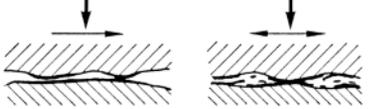
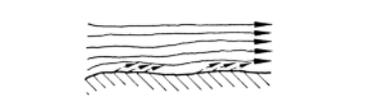
| Mechanismus | | Kennzeichen | Merkmal |
|--|---------------------------|---|--|
| Adhäsion | |  | Vertiefungen, Riefen, Risse, Werkstoffübertrag, Verformung, Gefügeänderung |
| Abrasion | |  | Riefen, Span, Wall, Mulden, Wellen, Verformung, Gefügeänderung |
| Oberflächenzerrüttung | |  | Verformung, Risse, Grübchen, Gefügeänderung |
| Tribos-chemische und/oder tribo-physikalische Reaktionen | Reaktions-schicht-bildung |  | Schichtbildung, Oxidation |
| | Ablation |  | Verdampfen, Ausgasen, Zersetzen |

Bild 2.5: Verschleißmechanismen bei tribologischer Beanspruchung

2.4.1 Adhäsion

Technische Oberflächen sind nie ideal glatt, weshalb die Kraftübertragung lokal an einzelnen Kontaktstellen erfolgt. Durch Normal- und Schubbeanspruchungen setzt eine elastisch-plastische Verformung ein, die zur Zerstörung von Adsorptions- und Reaktionsschichten führt. Die metallisch blanken Kontaktbereiche gehen durch atomare Bindungen mehr oder weniger feste Verbindungen ein. Die Bildung derartiger Haftbrücken wird als Adhäsion bezeichnet. Besonders hohe Adhäsion wird im Vakuum wirksam. Die Festigkeit der sich ausbildenden Haftbrücken entscheidet darüber, ob die Trennung in der Bindungsebene oder außerhalb davon im Grundwerkstoff einer der beiden Festkörper erfolgt. Findet die Trennung außerhalb der Bindungsebene statt, so führt dies zu einem Werkstoffübertrag und letztlich zu Verschleiß, insbesondere nach mehrfachen Übergleitungen und der Hin- und Rückübertragung von Werkstoff.

Anhand eines einfachen Modells hat Archard [18] folgenden empirischen Zusammenhang zwischen adhäsivbedingtem volumetrischen Verschleiß W und der Normalkraft F_N , dem Gleitweg s und der Härte H des weicheren Partners hergestellt:

$$W = k_{ad} \cdot \frac{F_N \cdot s}{H} \quad (2.4)$$

Der Faktor k_{ad} steht für die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Verschleißpartikeln und kann sich über mehrere Größenordnungen erstrecken.

Durch lokale Mikroverschweißungen (Fressen) rauhen sich die Oberflächen auf, wobei charakteristische Erscheinungsformen wie Riefen, plastische Verformungen, Scherwaben, Werkstoffübertrag, Schubrisse, Gefügeumwandlungen entstehen. In **Bild 2.6** und **2.7** sind Beispiele adhäsiver Verschleißerscheinungsformen wiedergegeben.

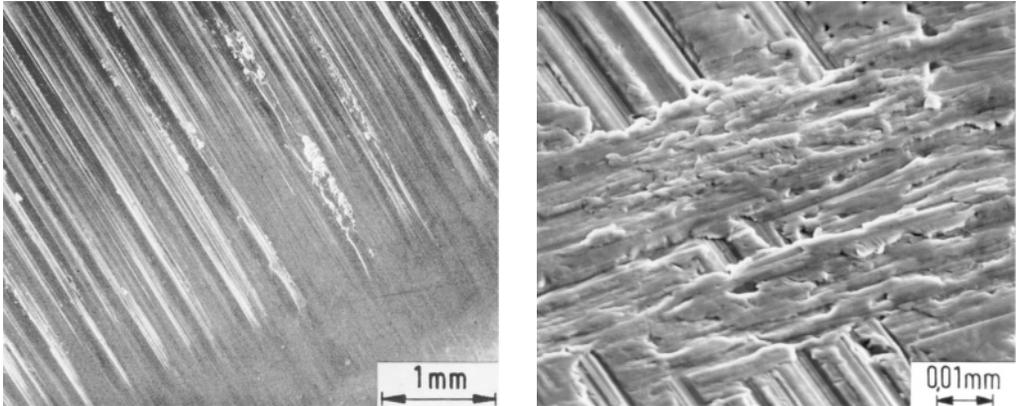


Bild 2.6: Adhäsiv bedingte Riefen im Fußbereich einer Zahnflanke aus 20MnCr5 unter Verwendung des Schmierstoffes FVA-3HL + 4,5 % Anglamol 99 bei Mischreibung (links) und Werkstoffübertragung auf einem gehärteten Schlagbolzen eines Presslufthammers bei Mangelschmierung (rechts)

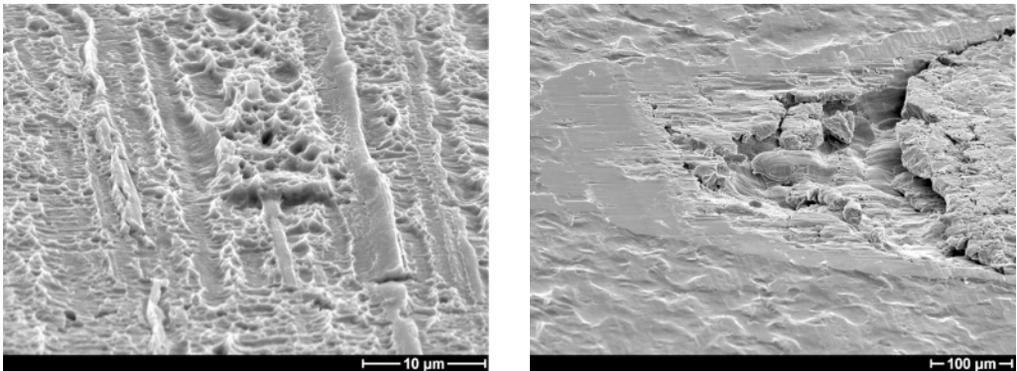


Bild 2.7: Verformungswaben auf Neusilber Cu62Ni18Zn20 (links) und Schubrisse auf ZStE 300 (rechts) im Hertzschen Linienkontakt bei Ultraschallanregung einer gehärteten Scheibe aus 100Cr6 gegen eine ruhenden Flachprobe; Beanspruchungsbedingungen: Ultraschallfrequenz 20 kHz, $p = 220 \text{ N/mm}^2$, Amplitude $\pm 10 \text{ µm}$, Dauer des Ultraschallsignals 50 ms entsprechend 1000 Schwingungen, Schmierstoff unlegiertes Ziehöl der kinematischen Viskosität $\nu = 300 \text{ mm}^2/\text{s}$